

Висновки. Таким чином, аналізуючи всі отримані результати, було прийнято рішення, що для малогабаритних осьових робочих коліс з низьким значенням коефіцієнту швидкохідності найбільше підходить РК №3, що має профіль НАСА. Дане робоче колесо не тільки покращило напірні та енергетичні характеристики ступеню, а й повністю задовольнило вимогам міцності.

Список літератури: 1. Гусак О.Г. Перспективи використання осьових насосів для артезіанського водопостачання/ О.Г. Гусак, О.А. Демченко, І.П. Каплун // Промислова гідравліка та пневматика. – 2010. - №4(30). – С. 8-11. 2. Гусак О.Г. Порівняльний аналіз методик проектування протічних частин осьових насосів/ О.Г. Гусак, О.А. Демченко, І.П. Каплун // Наукові праці ДонНТУ. Серія гірничо-електромеханічна. – 2011.- Вип. 21(189). – С. 44-58. 3. Proceedings of the 4th international meeting on Cavitation and dynamic problems in hydraulic machinery and systems IAHR-WG 2011 /edited by: A. Gajic, M. Benisek, M. Nedeljkovic// Investigation of small-sized axial-flow stage of a borehole pump for water supply/ A. Gusak, O. Demchenko, I. Kaplun – Belgrade: University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, 2011. – Р.143 – 150. 4. Ломакин А.А. Центробежные и осевые насосы / А.А. Ломакин - М.: Машиностроение, 1966. - 364с. 5. Михайлов А.К. Лопастные насосы. Теория, расчет и конструирование / А.К. Михайлов, В.В. Малюшенко – М., «Машиностроение», 1977. – 288 с. 6. Гусак О.Г. Вплив осьового зазору на параметри малогабаритного осьового ступеню низької швидкохідності свердловинного насоса / О.Г. Гусак, І.П. Каплун, О.А. Матвієнко// Наукові праці ДонНТУ. Серія гірничо-електромеханічна. – 2011. – Вип. 22 (195). – С. 75-87. 7. Меркулов В.М. О влиянии параметров бандажирования на надежность и ресурс рабочих лопаток турбин / В.М. Меркулов, Ю.В. Якушев, Н.Н. Федорченко, А.П. Зиньковский // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. - №10 (67). – С. 167-171. 8. Пат. 2264561 Российская Федерация МПК7 F04D29/34 Ступень осевого компрессора газотурбинного двигателя / Аверичкин П.А., Зайнулин И.Г., Зайнулина И.Н., Резуненко В.Ф., Храпач Н.А. - №2004117194/06; заявл. 08.06.2004; опубл. 20.11.2005. 9. Зимницкий В.А. Лопастные насосы. Справочник/ В.А. Зимницкий, А.В. Каплун, А.Н. Папир, В.А. Умов/ под ред. В.А. Зимницкого, В.А. Умова. – Л.: Машиностроение, 1986. – 334 с. 10. Charles L. Ladson Computer Program To Obtain Ordinates for NACA Airfoils / Charles L. Ladson, Cuyler W. Brooks, Jr., Acquilla S. Hill, and Darrell W. Sproles// National Aeronautics and Space Administration. Langley Research Center. Hampton, Virginia 23681-0001, 1996. – 27 p. 11. Насилов С.Н. О влиянии на гидродинамические характеристики плоской насосной решетки ее геометрических параметров и числа Рейнольдса/ С.Н. Насилов, Б.М. Твердовский // Труды ВНИИГидромаша. Гидромашиностроение. – 1963. – Вып. XXXIII. – С. 89-109. 12. Gusak A. Energy-efficient borehole pumps based on axial stages of low specific speed/ Gusak, O. Demchenko, I. Kaplun // MOTROL 12d, 2010. – Р. 45-54. 13. ANSYS CFX 10.0 Solver Models. Release 10.0 [Электронный ресурс], 2008. - 549р. - Режим доступа: <http://www.ansys.com>. 14. Мавлюдов А.М. Движители быстроходных судов / А.М. Мавлюдов, А.А. Русецкий, Ю.М. Садовников, Э.А. Фишер. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л., Судостроение, 1982. – 280с.

Поступила в редколлегию 09.06.2012

УДК 621.4.002.2: 629.73.002.72

Г.Б. ФІЛІМОНІХІН, докт. техн. наук, проф., КНТУ, Кіровоград,
А.Ю. НЕВДАХА, асис., КНТУ, Кіровоград

АПРОБАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЇ СКЛАДАННЯ РОТОРІВ ГТД БДТ ЗА МЕТОДОМ ДВОХ ПРОБНИХ СКЛАДАНЬ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ 3D МОДЕЛЮВАННЯ

Описується комп'ютерна 3D модель ротора ГТД БДТ. Моделюються основні операції і переходи типових технологічних процесів зі складання роторів цього типу методом двох

пробних складань. Описується комп'ютерна програма для проведення розрахунків і процес її відлагодження. Сформульовані задачі подальших досліджень.

Ключові слова: комп'ютерна 3D модель, газотурбінний двигун, ротор барабанно-дискового типу, складання ротора, технологія складання.

Описывается компьютерная 3D модель ротора ГТД БДТ. Моделируются основные операции и переходы типовых технологических процессов по сборке роторов этого типа методом двух пробныхборок. Описывается компьютерная программа для проведения расчетов и процесс ее отладки. Сформулированы задачи последующих исследований.

Ключевые слова: компьютерная 3D модель, газотурбинный двигатель, ротор барабанно-дискового типа, сборка ротора, технология сборки.

The 3D computer model of the GTA DDT rotor is described. The basic operations and transitions of standard technological processes on assembling of rotors of this type by the method of two trial assembling are designed. The computer program for conducting of computations and process of its debugging is described. The tasks of subsequent researches are formulated.

Keywords: 3D computer model, gas-turbine engine, rotor of drum-disk type, assembling of rotor, standard process, technology of assembling.

1. Вступ

На сьогоднішній день найбільш перспективною технологією остаточного оптимального складання роторів газотурбінних двигунів (ГТД) барабанно-дискового типу (БДТ) є технологія, заснована на методі двох пробних складань, що розроблена в роботах І.Ф.Кравченка, Е.В.Кондратюка, В.А.Тітова, Г.Б.Філімоніхіна, Г.І.Пейчева, О.Я.Качана [1-4]. Технологія, зокрема, містить типові технологічні процеси, математичну модель оптимального віртуального складання роторів ГТД БДТ, алгоритми розрахунків, комп'ютерну програму для розрахунків, перелік і вимоги до вимірювальних приладів.

У відповідності з технологією, ротор розбивається на ланки, двічі пробно складається з певним взаємним розворотом ланок, після кожного пробного складання на поворотному складальному стапелі (ПСС) заміряються биття контрольних поверхонь (КП) ланок, потім ротор складається третій раз – остаточо, з оптимальними взаємними розворотами ланок, розрахованими за певним алгоритмом. Такий метод не потребує додаткових пристосувань для деталей ротора (центруючих, притискних, перехідних контрольних тощо) і найбільш ефективний, так як характеристики пар визначаються безпосередньо, а не розраховуються за величинами биття посадочних поверхонь ланок. Проте він більш ефективний для складання консольних, ніж двоопорних роторів, оскільки биття КП заміряються на ПСС. У зв'язку з цим в роботі Філімоніхіна Г.Б., Невдахи А.Ю. [5] було побудовано математичну модель складання двоопорних роторів БДТ методом двох пробних складань з заміром биття на призмах.

В роботі [6] описано стенд для апробації типових процесів складання роторів БДТ за методом двох пробних складань з заміром биття на ПСС та на призмах. При замірі биття КП ланок натурального ротора виявлені похибки вимірювань. Це обумовлено шорсткістю КП, неточністю встановлення ніжки індикатора, власною похибкою вимірювального приладу тощо. Наявність таких похибок ускладнює апробацію методу двох пробних складань. Виникає потреба в створенні умов, в яких будуть відсутні похибки вимірювань.

В цій роботі в системі автоматичного проектування SolidWorks моделюється типовий ротор ГТД БДТ і процес заміру биття його контрольних поверхонь (КП) на ПСС та на призмах. За допомогою 3D моделі:

- моделюються основні операції і переходи типових процесів методу двох пробних складань ротора ГТД БДТ з заміром биття на ПСС та на призмах;
- перевіряються алгоритми розрахунків та відлагоджується комп'ютерна програма, що забезпечує розрахунки в типових процесах.

2. 3D модель ротора ГТД БДТ та моделювання типових процесів її складання

3D-модель ротора ГТД БДТ відображає його основні властивості. З використанням 3D-моделей ротора, ПСС та призм можна моделювати окремі операції і переходи типових процесів методу двох пробних складань:

- розмітку ланок ротора;
- складання ротора з певним взаємним розворотом ланок;
- встановлення ротора на ПСС чи призми;
- замір радіального та торцевого биття КП ланок ротора на ПСС чи призмах.

При створенні 3D моделі ротора ГТД БДТ було умовно виділено три типи ланок: вал передній (рис. 1, а); робоче колесо (рис. 1, б); вал задній (рис. 1, в). Кожна ланка ротора ГТД має фактичне тіло, технологічні КП та посадочні поверхні. Лопатки та інші конструктивні елементи ланок, які не впливають на процес остаточного складання роторів за методом двох пробних складань, не моделюються.

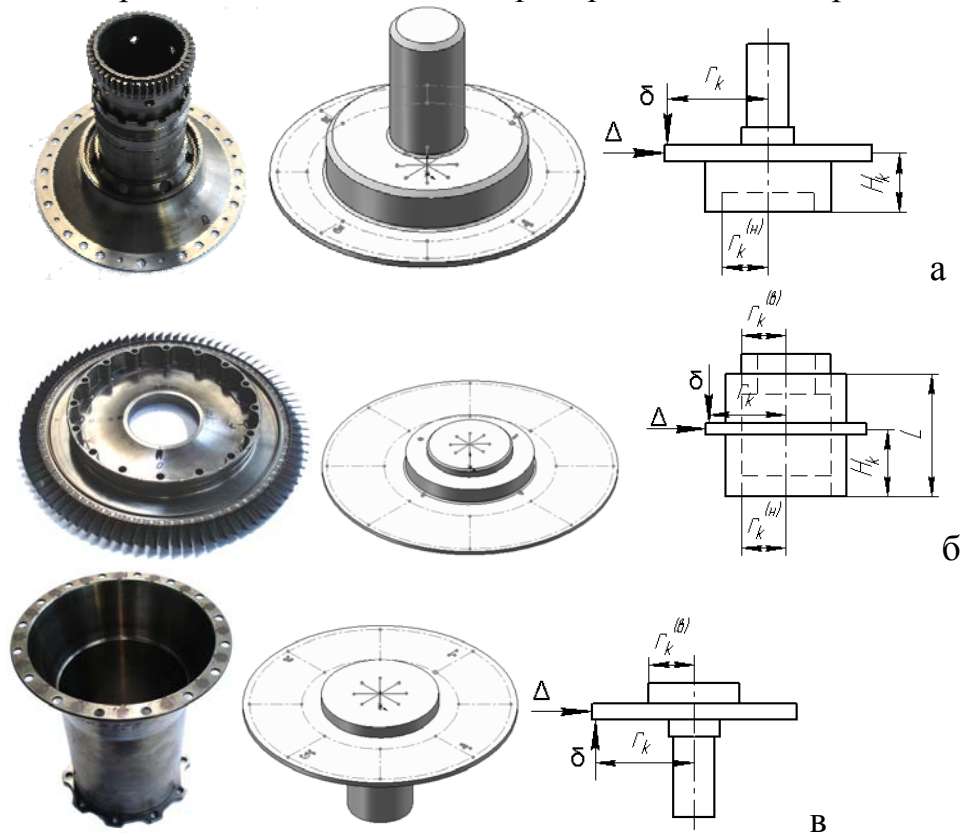


Рис. 1. 3D моделі типових ланок ротора ГТД БДТ: а – вал передній; б – робоче колесо; в – вал задній

В 3D моделі ротора задаються кількість і основні геометричні розміри ланок ротора, а величини ексцентриситетів і перекосів посадочних поверхонь ланок встановлюються випадково, що дозволяє скласти різні роторні комплекти одного типу ротора. З врахуванням цих особливостей 3D модель ротора ГТД БДТ є імітаційною комп'ютерною моделлю (ІКМ).

Відповідно до технології складання роторів [4] на ланки ротора нанесено розмітку для відрахування кутів (рис. 2). Кут на ланці збільшується проти ходу годинникової стрілки, якщо дивитись зверху на ротор, встановлений на ПСС, чи з

боку останньої ланки на ротор, встановлений на призми. У реальних роторах ланка $(k+1)$ з'єднується з ланкою k призонними чи стяжними болтами у кількості 8, 16, 24 чи 32 штук (рис. 2, а).

Кількість болтів задає

кількість варіантів установки ланки $(k+1)$ на ланку k . Призонні болти було змодельовано точками, рівномірно розподіленими по колу, що лежить у торцевій посадочній поверхні (рис.2, б).

Фактичне тіло ланки 3D моделі ротора має спільну вісь з КП, а посадочні поверхні виконані із деяким ексцентриситетом та перекосом (рис. 3). Це моделює процес виготовлення ланок реального ротора із похибками, наприклад, коли контрольні і

посадочні поверхні обробляються не за одну установку деталі на верстат.

Слід відмітити, що 3D модель ротора створена з застосуванням параметричних таблиць, в які занесені параметри ротора, необхідні для реалізації методу двох пробних складань: кількість ланок в роторі; кількість варіантів установки ланки $(k+1)$ на ланку k в парі; радіуси, на яких заміряються торцеві биття КП ланок; відстані між площинами заміру радіального биття в парі; радіус нижньої посадочної поверхні ланки k (рівний радіусу верхньої посадочної поверхні ланки $(k+1)$); відстань між нижньою посадочною поверхнею ланки k і її КП для заміру радикального биття (рис.3).

Комп'ютерна 3D-модель має наступні переваги перед натурним ротором:

- можна створювати роторні комплекти з різною кількістю ланок;
- можна оперативно змінювати геометричні розміри ланок ротора;
- можна довільно змінювати неточність виготовлення посадочних поверхонь ланок ротора;
- можна змінювати кількість призонних болтів;
- не витрачається час на складання реального ротора, не зазнають пошкоджень його деталі від багаторазових складань і розбирань, завжди стабільні показання (індикаторів) при замірі биття КП.

Для моделювання процесу заміру биття створено 3D моделі ПСС та призми. 3D модель ПСС (рис. 4, а) виконана у вигляді напрямної втулки 1 (моделює



Рис. 2. Розмітка ланки ротора КВТ ГТД з отворами під болти: а – фотографія; б – 3D модель

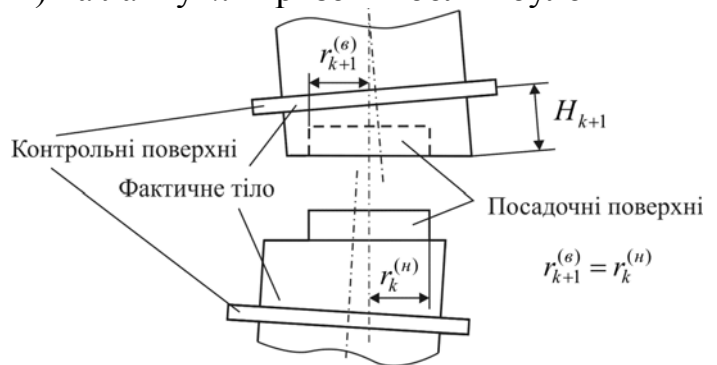


Рис. 3. З'єднання ланок ротора за посадочними поверхнями, що неточно виготовлені

центрувальне пристосування), індикаторних стійок 2, та індикаторних площин 3 (моделюють індикатори биття). 3D модель призми (рис. 4, в) виконана у вигляді горизонтального променя 4 (моделює призми), індикаторних стійок 2, та індикаторних площин 3.

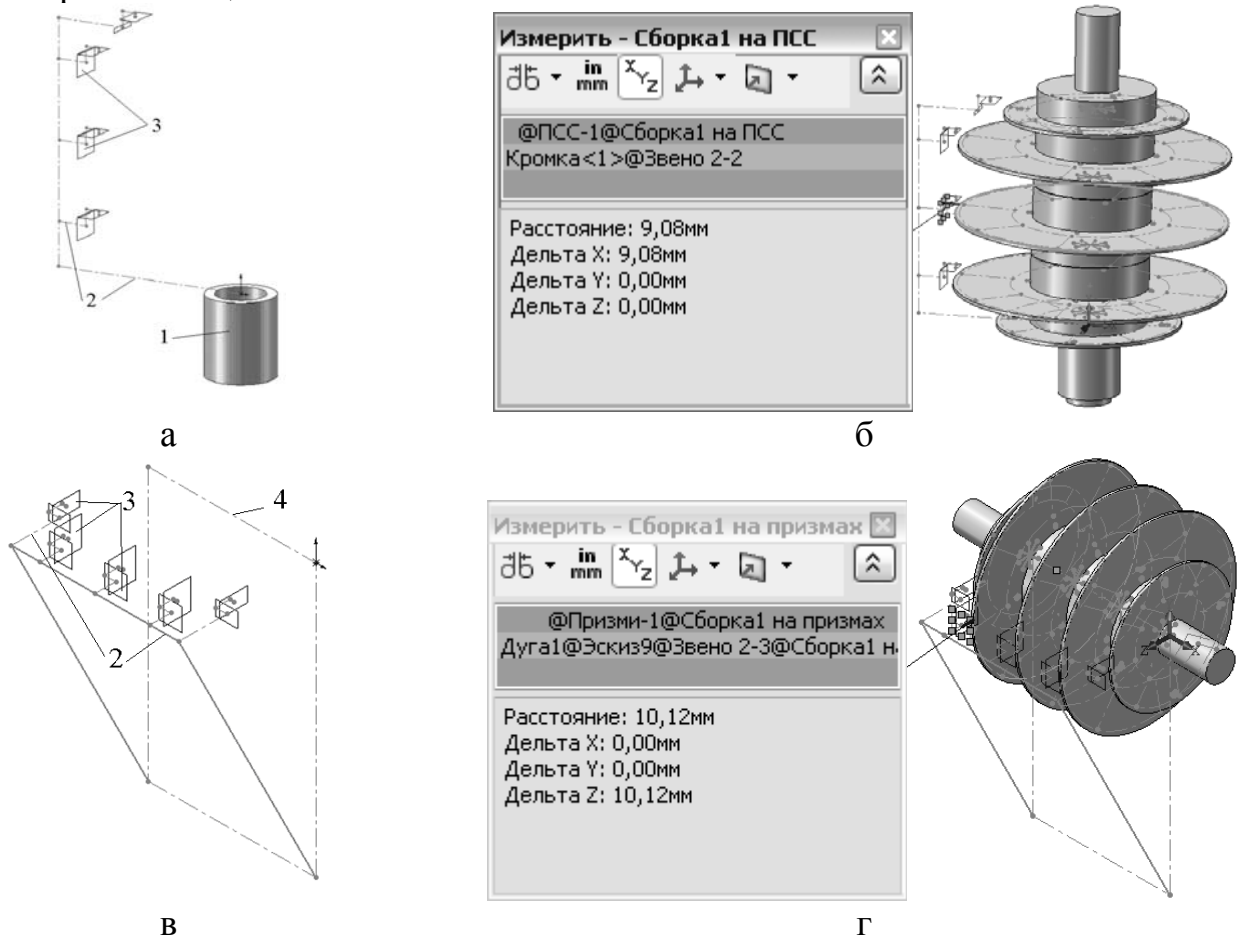


Рис. 4. Моделювання заміру биття КП ланок ротора ГТД БДТ: а – комп’ютерна модель ПСС; б – моделювання заміру биття КП (консольного чи двоопорного) ротора БДТ, встановленого на ПСС; в – комп’ютерна модель призми; г – моделювання заміру биття КП двоопорного ротора БДТ, встановленого на призмах

Як видно з рис. 4, б, г, замір биття КП ротора здійснюється за допомогою інструментів заміру САПР SolidWorks. Величину биття визначає відстань між індикаторними площинами 3 та мітками, нанесеними на КП ланок ротора.

3. Програма для числових розрахунків

Для проведення числових розрахунків, що забезпечують типові процеси складання роторів ГТД БДТ методом двох пробних складань з заміром биття на ПСС та на призмах, в середовищі швидкої розробки програм Borland Delphi, було написано програму. При її створенні використано алгоритми розрахунків, описані в роботах [4, 5].

Програма написана з можливістю подальшого розширення та корегування алгоритмів. Для цього створено окремий модуль, в якому у вигляді процедур реалізовані окремі забезпечуючі алгоритми.

Інтерфейс програми сам підказує користувачу послідовність дій (рис.5, а).

При виборі типу ротора (рис.5, б) завантажується інформація про конкретний

тип ротора: загальна кількість ланок, кількість варіантів з'єднання сусідніх ланок, необхідні для розрахунків геометричні розміри ротора, обмеження на биття і коефіцієнти функціонала якості. Якщо потрібного типу ротора немає, то його можна створити самостійно, ввівши відповідні дані. При введенні даних автоматично розраховується інша додаткова інформація про ротор, зокрема – загальна кількість варіантів його складань.

а

б

в

г

д

Рис. 5. Вікна програми складання роторів ГТД БДТ методом двох пробних складань: а – головне (після введення всіх даних); б – вибору чи завдання типу ротора; в – вибору номера комплекту; г – вибору виду складання ротора; д – розрахунку оптимальних кутів

Вид складання ротора (рис.5, г) визначає, де саме будуть заміряться биття КП – на ПСС чи на призмах. Також в цьому вікні вказується точність приладу для вимірювання биття.

При виборі номеру комплекту (рис.5, в) користувачем вводяться биття КП

ланок конкретного роторного комплексу (або завантажуються з файлу, якщо вони вже були введені): еталонні, першого та другого пробного складання. В цьому вікні, при введенні даних, в режимі реального часу, розраховуються характеристики пар та неточність виготовлення посадочних поверхонь.

Після вводу всіх даних можна виконувати розрахунки:

- разового складання (для цього потрібно вказати конкретні кути взаємного розвороту ланок чи порядковий номер варіанта складання – від 0 до максимального – розрахованого у вікні типу ротора);
- оптимальних кутів (рис.5, д);
дисбалансу ротора.

Вікно разового віртуального складання ротора співпадає за виглядом із вікном розрахунку оптимальних кутів (рис. 5, д). Тільки у цьому вікні є можливість задавати номер складання ротора чи кути повороту ланок ротора. За ними розраховується значення функціонала якості і биття КП ланок ротора (прогнозовані биття).

4. Апробація типових процесів, перевірка алгоритмів розрахунку та відлагодження програми

За допомогою ІКМ перевірялась робота програми. Для цього створено такі 3 різні типи роторів.

1. З деякими ексцентриситетами та відсутніми перекосами посадочних поверхонь ланок ротора. Оптимальні кути повороту відомі. Торцеві і радіальні биття КП ротора при оптимальних кутах – відсутні.

2. З відсутніми ексцентриситетами та деякими перекосами посадочних поверхонь ланок ротора. Оптимальні кути повороту відомі. Торцеві і радіальні биття КП ротора при оптимальних кутах – відсутні;

3. З деякими ексцентриситетами та перекосами посадочних поверхонь ланок ротора. Оптимальні кути повороту невідомі.

В рамках експерименту:

- змодельовано описані в роботах [4, 5] основні операції і переходи типового процесу оптимального складання роторів з заміром биття КП на ПСС та на призмах;

- заміряно биття КП після першого та другого пробного складань;
- заміряні дані та інформація про ротор занесені до програми для числових розрахунків і розраховані оптимальні кути;
- порівняні розраховані кути з дійсно оптимальними;
- складено ротор з оптимальними кутами і перевірені биття його КП;
- складено ротор з довільним взаємним розворотом ланок, заміряні досягнуті биття КП його ланок та порівняні з прогнозованими.

Експерименти проводилися на роторах, що складаються з 2-х, 3-х, 4-х та 5-ти ланок; для кожного типу ротора створювалось три різні роторні комплекти; биття КП замірялись на ПСС та на призмах.

В результаті перевірені алгоритми розрахунків та відлагоджена сама програма. Отримано зручний інструмент для числових розрахунків. Встановлено, що биття КП ланок ротора при оптимальному складанні до 15 разів менші ніж при складанні ротора з довільним розворотом ланок.

Маючи натурну модель ротора, програму та ІКМ типового ротора БДТ, можна: планувати та проводити багатофакторні експерименти по визначенню стійкості методу до неточності заміру биття КП ланок ротора чи неточності встановлення індикатора биття; визначати ефективність методу двох пробних складань з заміром биття на ПСС та на призмах; складати ротори ГТД БДТ на виробництві.

Висновки

За допомогою САПР SolidWorks створені 3D моделі типового ротора ГТД БДТ, ПСС та призми. Змодельовані основні операції та переходи типових процесів методу двох пробних складань роторів ГТД БДТ з заміром биття на ПСС та на призмах. Апробовані типові процеси та переходи цього методу складання роторів. Перевірені алгоритми розрахунків, та відлагоджена комп'ютерна програма для числових розрахунків. Доведена ефективність методу, зокрема встановлено, що биття КП ланок ротора при оптимальному складанні до 15 разів менші ніж при складанні ротора з довільним розворотом ланок.

Список літератури: 1. СОУ-Н МПП 49.050-074:2006. Складання роторів газотурбінних двигунів барабанно-дискової конструкції методом двох пробних зборок / *Е.В.Кондратюк, В.А.Тітов, Г.Б.Філімоніхін* // Настанова Міністерства промислової політики України, 2006. – 32 с. 2. Патент № 33372 Україна. Спосіб складання ротора газотурбінного двигуна / Кондратюк *Е.В., Пейчев Г.І., Тітов В.А., Тривайло М.С. Філімоніхін Г.Б.* – опубл. 25.06.2008, бюлетень № 12. 3. *Тітов В.А.* Забезпечення ресурсу та експлуатаційної надійності виробів машинобудування технологічними методами - науковий напрямок кафедри МПМ та РП НТУУ «КПІ» / *В.А.Тітов* // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Машинобудування». – 2010. № 60. с. 25-32. 4. *Кравченко И.Ф.* Сборка роторов ГТД барабанно-дискового типа: типовые процессы, алгоритмы расчетов: Монография / *И.Ф.Кравченко, Э.В.Кондратюк, В.А.Титов, Г.Б.Филимонихин, Г.И.Пейчев, А.Я.Качан.* – Киев: КВИЦ, 2011. – 197 с. 5. *Філімоніхін Г.Б.* Складання двоопорних роторів барабанно-дискової конструкції методом двох пробних складань з заміром биттів на призмах / *Г.Б.Філімоніхін, А.Ю.Невдаха* // Збірник наукових праць КНТУ, 2009, Вип. 22, С. 206–210. 6. *Філімоніхін Г.Б.* Стенд для дослідження процесу складання роторів барабанно-дискової конструкції / *Г.Б.Філімоніхін, А.Ю.Невдаха* // Збірник наукових праць КНТУ, 2010, Вип. 22, С. 206–210.

Поступила в редколлегию 15.06.2012

УДК 629.4.08

В. В. АРТЕМЧУК, канд. техн. наук, доц., Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. В. Лазаряна,
А.А. БОСОВ, канд. техн. наук, доц., дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. В. Лазаряна,

НЕОБХІДНІ УМОВИ В ЗАДАЧІ ВЕКТОРНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ДЛЯ ФУНКЦІОНАЛІВ СТОСОВНО ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

В роботі представлено розв'язок задачі векторної оптимізації в просторі функціоналів. Розроблений алгоритм можна застосовувати для техніко-економічної оцінки технології